

Les sédiments marins, archives du climat : l'exemple du delta du Nil

Auteurs : Marie REVEL

Maître de conférence, Géoazur (UMR 7329), université de Nice Sophia Antipolis,
Christophe COLIN

Directeur-adjoint du laboratoire GEOPS, Laboratoire Géosciences Paris-Sud, université Paris-Sud, Orsay,
Guillemette MENOT

Professeur, ENS-Lyon, Laboratoire de Géologie de Lyon
& Sébastien PIVOT

PhD, CEREGE, Technopôle de l'Arbois, Aix-en-Provence

Le bassin méditerranéen est une région particulièrement sensible aux changements hydrologiques, et ses ressources en eau, provenant en partie des précipitations en Afrique du Nord, y ont toujours représenté un élément crucial pour le développement de la végétation et des sociétés agricoles. Les variations hydrologiques (température et salinité) des masses d'eau en Méditerranée orientale jouent un rôle important sur la circulation thermo-haline de la Méditerranée et de l'océan Atlantique Nord (Bethoux *et al.*, 1999 [3] ; Rohling *et al.*, 2015 [19]). La salinité des eaux profondes en Méditerranée de l'Est (figure 1), qui alimentent l'Atlantique Nord en sortant en profondeur à Gibraltar, contribue au bilan en sel de la mer du Groenland. Ainsi, une augmentation de salinité va concourir à intensifier la formation d'eau profonde en mer du Groenland, processus qui contrôle les précipitations affectant l'Europe et le pourtour méditerranéen (cf. C. Millot pour plus de précisions [22]).

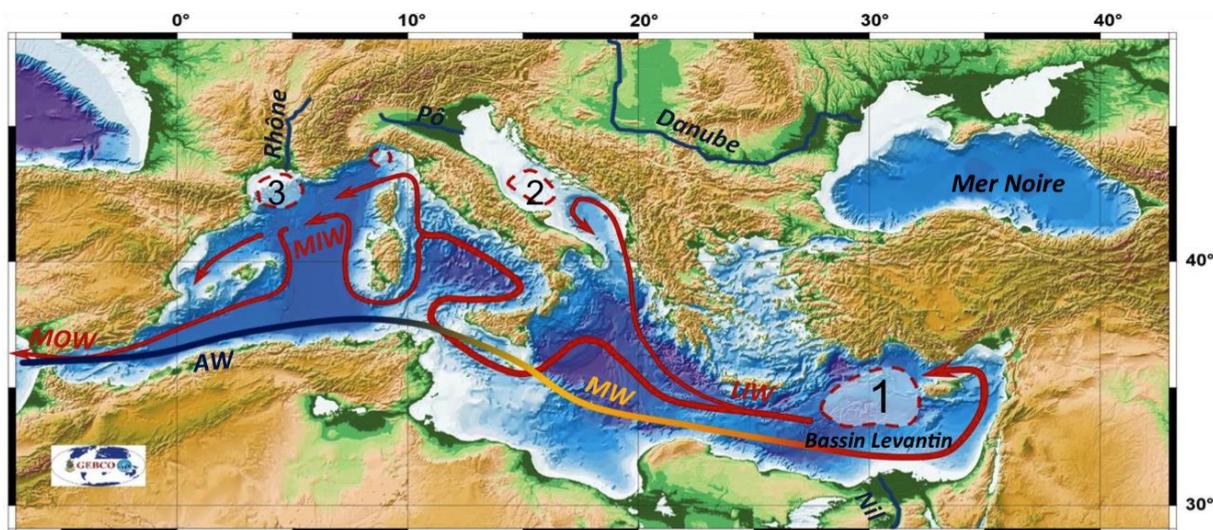


Figure 1. Schéma de la circulation thermo-haline au sein du bassin méditerranéen (d'après Pinardi & Maseti, 2000 [13]). Le tracé bleu devenant orange représente la trajectoire des eaux de surface, qui en se déplaçant vers l'est deviennent plus chaudes et salées car l'évaporation est plus efficace. Les traits rouges représentent la trajectoire des eaux intermédiaire et profonde.

1 : formation des masses d'eau intermédiaire levantine. 2 : formation d'eau profonde adriatique. 3 : formation d'eau profonde MIW au niveau du golfe du Lion.

AW : eau atlantique (*Atlantic Water*)

LIW : eau intermédiaire levantine (*Levantine Intermediate Water*)

MIW : eau intermédiaire méditerranéenne (*Mediterranean Intermediate Water*)

MOW : eau méditerranéenne sortante (*Mediterranean Overflow Water*)

MW : eau méditerranéenne (*Mediterranean Water*)

Le fleuve Nil est composé du Nil Bleu, dont la source la plus importante se situe sur le haut plateau éthiopien au niveau du lac Tana, et du Nil Blanc dont la source se trouve en Afrique équatoriale à proximité du lac Victoria (figure 2). Les sources principales de particules terrigènes se déposant au sein du delta du Nil sont, quant à elles, des aérosols provenant du désert saharien et transportés par le vent, ainsi que la matière en suspension des crues du Nil Bleu, transportée par le fleuve (les apports provenant du Nil Blanc sont considérés comme minimes).

Le haut plateau éthiopien est caractérisé par des affleurements d'origine basaltique et datant du Tertiaire (qui a débuté il y a 65 millions d'années) ; le désert libyen est caractérisé quant à lui par un socle cristallin de roches granitiques, remontant au Précambrien (de 4 550 à 540 millions d'années). On sait que l'érosion du plateau éthiopien est active depuis les 30 derniers millions d'années (Pik *et al.*, 2003 [12]), et que le matériel terrigène en résultant est ensuite transporté et déposé au débouché du Nil, participant ainsi à la construction du delta du Nil.

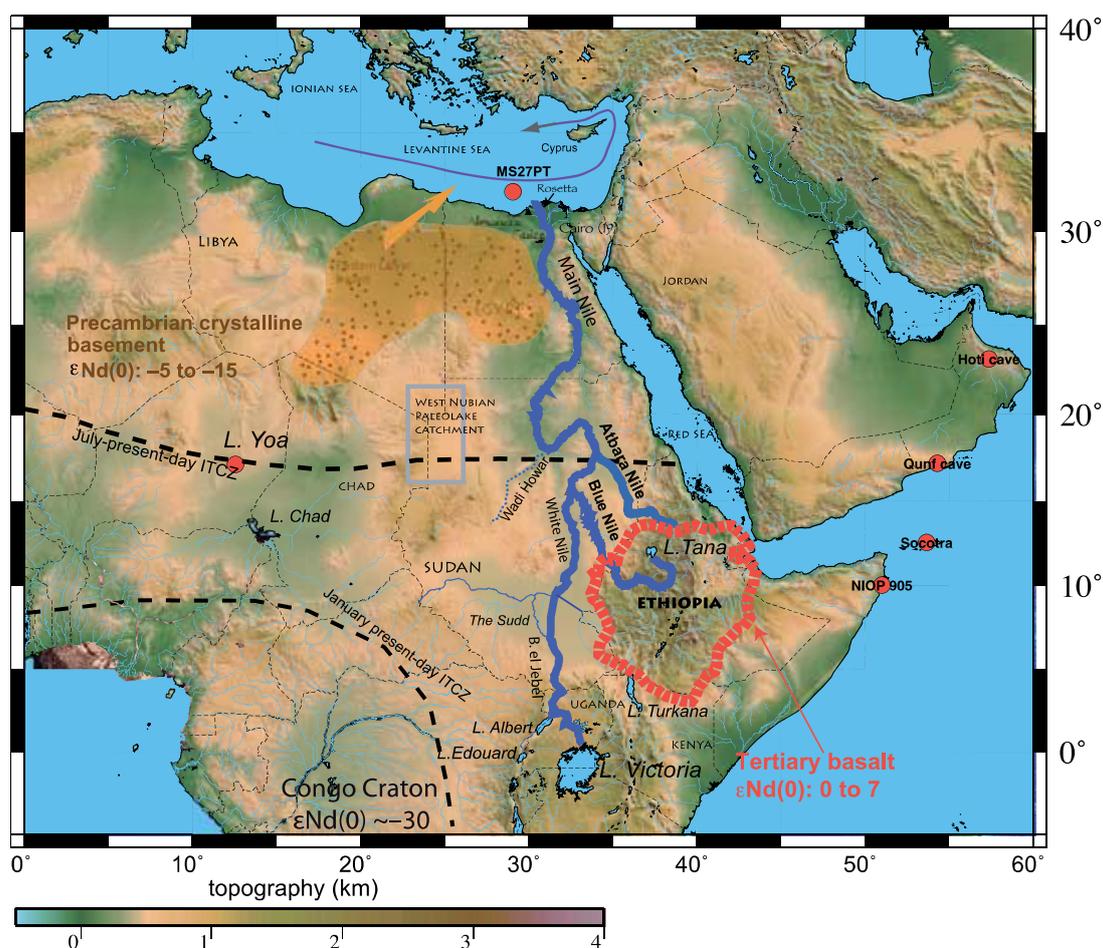


Figure 2. Carte de l'Afrique nord-orientale, illustrant les trois sources principales de particules déposées au sein du delta du Nil : *i.* les apports fluviaux du Nil Bleu/Atbara : haut plateau éthiopien (le contour en rouge délimite le plateau éthiopien, caractérisé par des affleurements basaltiques enrichis en fer), *ii.* les apports fluviaux du Nil Blanc : lacs équatoriaux, et *iii.* les aérosols sahariens : la zone principale de soulèvement et de transport des aérosols sahariens par les vents de sud-ouest vers la mer Levantine est représentée en ocre orangé.

Le climat de l'Afrique a été le théâtre d'une variation hydro-climatique rapide. Il y a environ 10 000 ans¹, le Sahara était une région humide et couverte de végétation comme l'attestent les gravures rupestres néolithiques du Tassili (figure 3), alors que l'on n'y observe de nos jours que des sols secs et dénudés. Ce changement de précipitation, qui a affecté le continent africain, est connu depuis longtemps et est à l'origine de ce que l'on appelle le « Sahara Vert » (e.g. Said, 1993 [20]), mais il est revisité aujourd'hui à l'aide d'outils géochimiques performants (Revel *et al.*, 2015a [17]), qui autorisent une quantification des variations d'humidité et d'érosion des sols (dans le cadre du programme de l'INSU-MISTRALS-Paleomex). Les fortes précipitations qui ont sévi en Éthiopie il y a environ 10 000 ans, sont expliquées par les variations du changement de la position de la Terre par rapport au Soleil (phénomène de précession, Berger & Loutre, 1991 [2]). Cette intensification de la mousson africaine en Éthiopie s'est traduite par une érosion accrue des sols, un transport plus efficace de la matière en suspension par le Nil Bleu et donc, en final, par un dépôt plus important de sédiments d'origine basaltique au sein du delta du Nil. Au contraire, un climat plus aride se traduit par plus d'apports d'aérosols d'origine saharienne. La pétrologie très contrastée des différents sols africains permet, à partir d'outils géochimiques, de quantifier les variations de contribution de chaque source. Cette démarche fournit un bon indicateur des variations d'humidité ou d'aridité au cours du temps. **Quantifier l'évolution des précipitations en Afrique a pour but de mieux prédire dans le futur l'évolution de la sécheresse en Afrique, et donc ainsi aider l'homme à mieux s'adapter aux changements environnementaux qui vont faire suite aux changements hydro-climatiques.**



Figure 3. Exemple de gravure rupestre du Tassili. © Alessandro Passaré.

¹ Les âges mentionnés dans cette synthèse sont exprimés en années BP (= *Before Present* – « avant le présent », c.-à-d. comptés en années vers le passé à partir de 1950).

Dernièrement un groupe de chercheurs de Géoazur (Revel *et al.*, 2014 [16], 2015a [17] ; Skonieczny *et al.*, 2015 [21]) a réussi à reconstituer les variations hydrologiques passées du fleuve Nil et ainsi à mieux appréhender *i.* le rôle des variations de précipitation sur l'érosion et la végétation en Afrique, et *ii.* le rôle des apports en eau douce de ce fleuve sur la dynamique de la circulation thermo-haline en mer Méditerranée. Ce travail s'est appuyé sur le décryptage des messages archivés depuis 20 000 ans dans les dépôts sédimentaires prélevés au niveau du delta du Nil (figure 4).

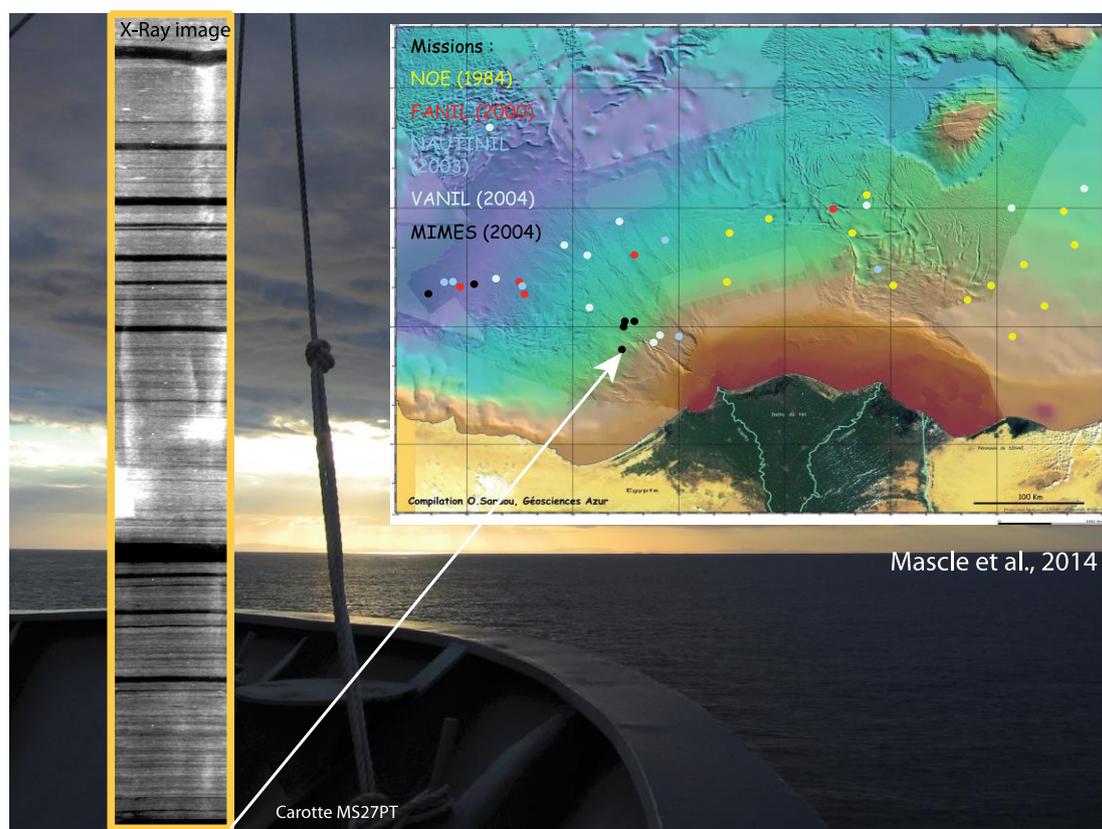


Figure 4. Carte de la morphologie du delta sous-marin du Nil (Masclé *et al.*, 2014 [11]), localisation de la série sédimentaire (ou carotte MS27PT), qui a été étudiée en détail. Les lamines sédimentaires plus sombres, sur la photo de cette carotte, indiquent des dépôts de crues du Nil exceptionnellement intenses.

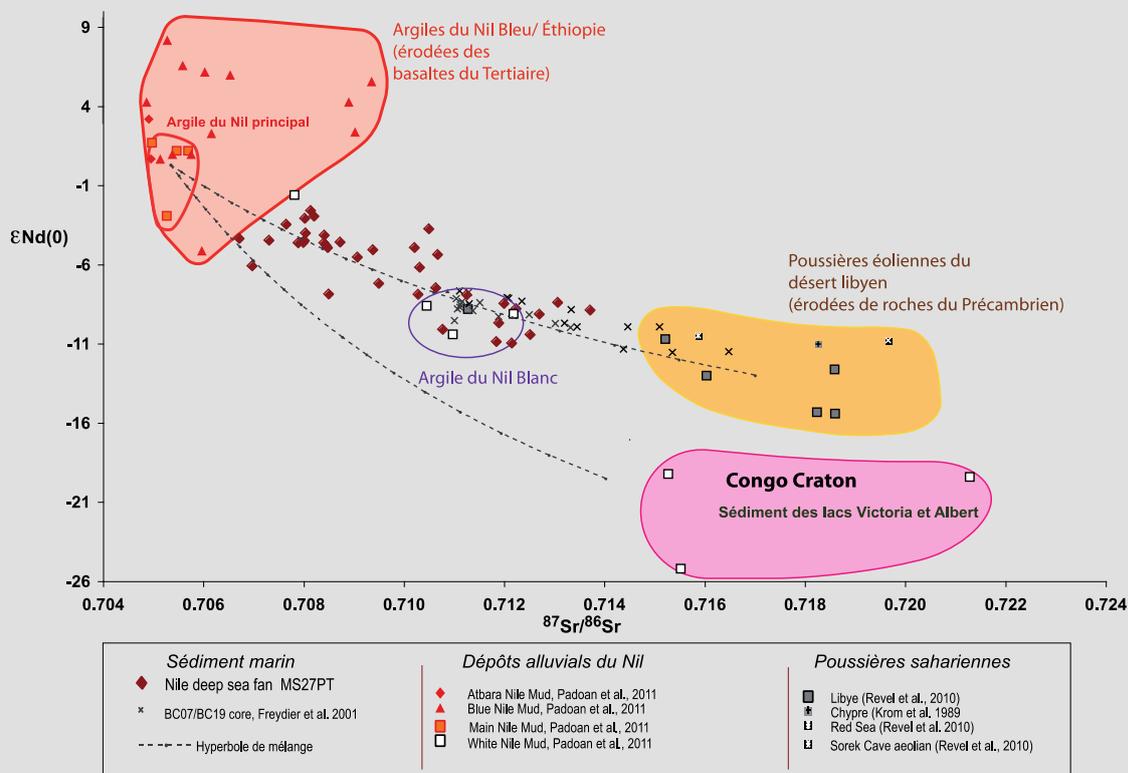
La composition isotopique en néodyme (rapport $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, exprimé sous la forme $\epsilon\text{Nd}(0)$), associée au rapport du fer sur le calcium ($\text{Log Fe}/\text{Ca}$) et à des analyses de pollens, a été utilisée pour reconstituer la fréquence des crues du Nil Bleu et l'histoire paléo-environnementale du bassin-versant du Nil depuis 20 000 ans (figure 5).

La présence de pollen de *Podocarpus* (un arbuste qui ne se développe qu'en climat tropical), combinée à la signature néodyme démontre que les apports continentaux proviennent d'Éthiopie ; cette démarche autorise alors l'interprétation de telles variations en termes **de fréquence des précipitations en Éthiopie**.



Les isotopes radiogéniques du néodyme (Nd) utilisés comme traceurs de provenance géographique

Le néodyme est un élément chimique du groupe des terres rares (famille chimique des lanthanides). Les variations du rapport des isotopes $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ des particules étudiées étant faibles, on les exprime sous forme de $\epsilon\text{Nd}(0) = [((^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{mesuré}} / (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}) - 1] \times 10^4$, où CHUR (*Chondritic Uniform Reservoir*) représente la composition isotopique moyenne de la Terre. Les zones sources principales de particules terrigènes qui se déposent au sein du delta du Nil sont les aérosols du désert saharien/libyen et la matière en suspension des crues du Nil Bleu/Atbara. La matière particulaire érodée en Éthiopie est caractérisée par une composition isotopique en néodyme se traduisant par des valeurs de $\epsilon\text{Nd}(0)$ comprises entre 0 et 7, ainsi que par une forte teneur en fer, tandis que les aérosols en Libye sont caractérisés par des valeurs de $\epsilon\text{Nd}(0)$ autour de -13 (figure 2). La composition isotopique des lamines sombres, observables au sein des sédiments, est caractérisée par des valeurs en $\epsilon\text{Nd}(0)$ qui tendent vers -2 , ce qui suggère que ces lamines correspondent à des dépôts quasi instantanés de matières en suspension, liées à des épisodes de fortes crues de la mousson éthiopienne. Ainsi, une augmentation du flux terrigène (Log Fe/Ca), associée à un ϵNd autour de -2 , indique une forte augmentation de l'activité fluviale du Nil Bleu. La pétrologie différente des sols africains est la condition qui permet de comparer la composition isotopique en néodyme et en strontium des sédiments du delta avec celles des zones sources potentielles, afin de quantifier les variations de contribution de chaque source au cours du temps.



Source : Revel et al., 2015a

Ces diverses analyses révèlent une réactivation de l'activité hydrologique du Nil il y a 14 600 ans, ainsi qu'une activité fluviale maximale en Éthiopie entre 12 000 et 8 400 ans, comme l'attestent à la fois la présence de pollen de *Podocarpus* et des apports massifs de sédiments éthiopiens. Cette activité fluviale, presque torrentielle, a entraîné un important flux d'eau douce en mer Levantine et un ralentissement de la circulation thermo-haline en Méditerranée. Ce ralentissement se manifeste par la présence de couches enrichies en matière organique, les fameux sapropèles. Cette intense phase fluviale diminue progressivement à partir de 8 400 ans et ce jusqu'à 3 200 ans. L'aridification atteint son apogée entre 3 700 et 2 600 ans. Les flux éoliens étaient alors plus importants qu'aujourd'hui, ce qui suggère une étendue des déserts plus grande et/ou une intensité des vents plus forte qu'aujourd'hui.

Ce travail s'inscrit dans une meilleure connaissance du couplage entre le cycle de l'eau et le climat. Comment évoluera le Sahara dans l'avenir ? Pour les siècles prochains, les modèles numériques prévoient une augmentation des précipitations et des flux d'eau douce vers les océans. Ces apports massifs d'eau douce peuvent jouer un rôle majeur sur la circulation océanique, avec pour conséquence une déstabilisation du couplage océan-atmosphère à l'échéance de la fin du siècle.

Pour la fenêtre temporelle des 20 derniers millénaires, nous avons, pour la première fois, pu démontrer que le début de la diminution de l'activité fluviale du Nil, datée d'il y a environ 8 400 ans, précède le refroidissement connu en Atlantique Nord vers 8 200 ans, phénomène expliqué jusqu'alors par la seule fonte des glaces de hautes latitudes (GIEC, 2013 [5]). Cette coïncidence chronologique remet en cause l'explication par la seule fonte des glaces du refroidissement rapide documenté vers 8 200 ans en Europe. Nous pensons que la réduction de l'activité fluviale du Nil aurait pu engendrer une reprise massive de la circulation thermo-haline en Méditerranée ; cette dernière aurait à son tour joué un rôle important sur la dynamique de la circulation thermo-haline en Atlantique Nord (Revel *et al.*, 2015a [17] ; Bahr *et al.*, en révision [1]). Une telle démarche met en lumière que la déstabilisation interne de l'équilibre climat-végétation-érosion des basses latitudes peut avoir directement influencé le couplage océan-atmosphère des moyennes et hautes latitudes, et non pas l'inverse. Depuis la construction du barrage d'Assouan en 1973, un tel enregistrement des crues du Nil au sein des sédiments déposés à son embouchure n'est plus possible.

L'intérêt de l'analyse des sédiments marins à l'embouchure d'un fleuve tel que le Nil est donc multiple : ces sédiments, contrairement à ceux des lacs africains, ont enregistré, en continu et avec une résolution décennale, l'histoire des crues d'été du Nil et, ainsi, celle des variations hydrologiques à l'échelle de l'Afrique de l'Est. Par ailleurs, ces sédiments se sont aussi déposés lors d'une période préhistorique au cours de laquelle des populations humaines ont connu, et subi, des variations hydrologiques rapides. Cette remarque permet d'établir un lien quasi direct entre variations paléo-environnementales et phases d'évolution et/ou d'occupation humaines.

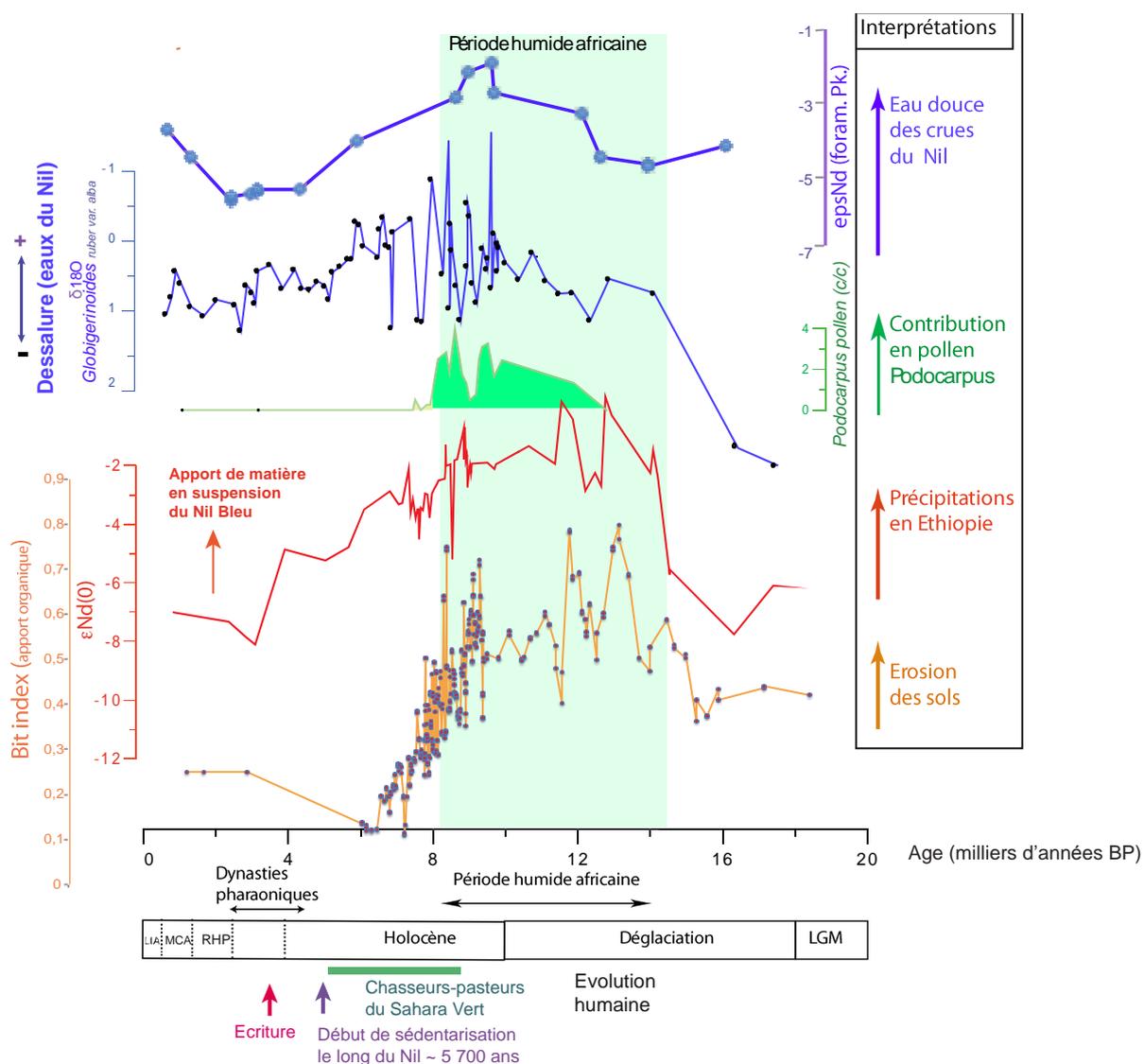


Figure 5. Reconstitution, depuis 20 000 ans, du degré d'érosion (à partir du Bit index qui correspond au rapport entre l'abondance relative de bactéries terrestres et marines, Hopmans *et al.*, 2004 [6] ; Pivot, 2015 [14] ; Pivot *et al.*, en préparation [15]), des précipitations en Éthiopie (isotopes du néodyme), de la concentration en pollen de *Podocarpus* et de la quantité d'eau douce déversée en mer Levantine (isotope de l'oxygène et du néodyme des foraminifères planctoniques) à partir de l'analyse de la carotte MS27PT.

LGM : *Last Glacial Maximum* ou Dernier Maximum glaciaire, RHP : *Roman Humid Period* ou Période humide romaine, MCA : *Medieval Climate Anomaly* ou Anomalie climatique médiévale, LIA : *Little Ice Age* ou Petit Âge de glace.

À l'échelle du temps préhistorique, le début de la sédentarisation et des premiers royaumes égyptiens remonte à 5 700 ans (Kuper & Kropelin, 2006 [8] ; Dee *et al.*, 2013 [4]). Cette datation coïncide avec une réduction drastique et une stabilisation de l'activité hydrologique du Nil (figure 6). Ces conditions environnementales ont favorisé l'installation de peuplades nomades le long du Nil, refuge naturel des populations contraintes d'abandonner les régions de savanes du « Sahara vert », progressivement affectées par la désertification (Manning & Timpson, 2014 [10]). Pendant plusieurs millénaires (avant 8 000 ans), ces régions, aujourd'hui désertiques, étaient peuplées, et une faune abondante (dont témoignent les gravures rupestres du Tassili) y vivait à l'époque néolithique, où l'actuelle vallée du Nil était une région de marécages plutôt hostiles excluant, ou limitant, la présence humaine. Au cœur d'une région aride, la présence, au sein de la vallée du Nil, d'eau et de terre arable a par la suite donné naissance, comme en Mésopotamie ou sur

les rives de l'Indus, à une civilisation agricole puis urbaine, que l'existence d'un pouvoir politique centralisé, et l'usage d'une écriture, font entrer dans l'Histoire à l'orée du III^e millénaire avant J.-C. L'empire pharaonique se serait donc ainsi mis en place lors d'une phase d'activité modérée du Nil. Une période aride signe la fin des dynasties pharaoniques (figure 6).

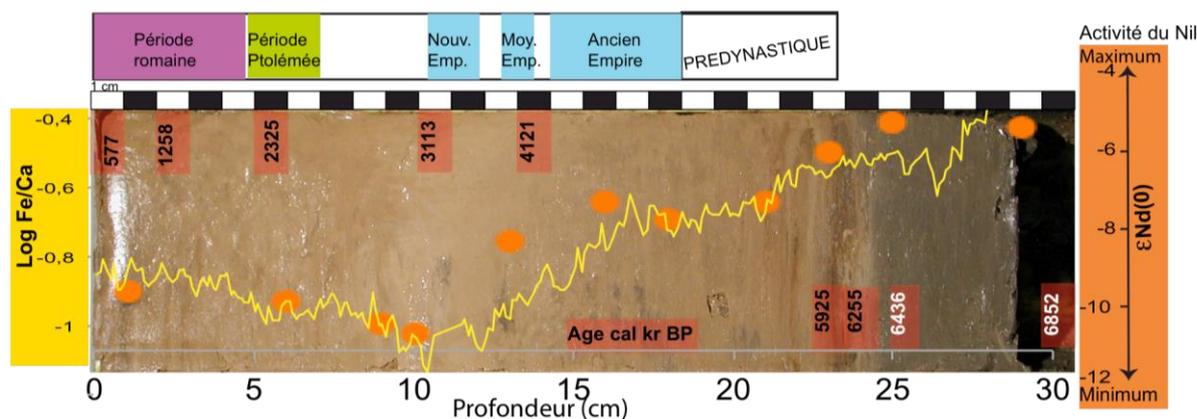


Figure 6. Photo de la section 1 de la série sédimentaire MS27PT. Changement de l'activité fluviale du Nil il y a environ 7 000 ans, comparé à la chronologie préhistorique et à l'histoire des dynasties pharaoniques en Égypte (Revel *et al.*, 2015b [18]).

Ce travail de reconstitution des variations hydrologiques du bassin-versant du Nil depuis 20 000 ans s'inscrit dans la démarche d'une meilleure compréhension des mécanismes contrôlant les variations spatio-temporelles des précipitations sur l'Afrique de l'Est. Quel sera, demain, le lien entre réchauffement climatique et aridification ? Il est probable que le réchauffement climatique va accentuer les sécheresses dans les régions subtropicales. En Afrique, une solution passe par le projet de Grande Muraille verte (<http://www.csf-desertification.org/combattre-la-desertification>) à l'honneur dans le cadre de la conférence COP21.

Pour en savoir plus :

- [1] Bahr *et al.*, en révision. Persistent monsoonal forcing of Mediterranean Outflow dynamics during the late Pleistocene. *Geology*.
- [2] Berger A. & Loutre M.F., 1991. Insolation values for the climate of the last 10 million years. *Quaternary Science Reviews*, 10, 297-317.
- [3] Bethoux J.P., Gentili B., Morin P., Nicolas E., Pierre C. & Ruiz-Pino D., 1999. The Mediterranean Sea: a miniature ocean for climate and environmental studies and a key for the climate functioning of the North Atlantic. *Progress in Oceanography*, 44, 131-146.
- [4] Dee M. *et al.*, 2013. New timeline for origin of ancient Egypt. *Proceedings of the Royal Society, A*, 468.
- [5] GIEC, 2013. *IPCC WGI Fifth Assessment Report Climate Change 2013*. Chapter 5 : Information from Paleoclimate Archives. <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
- [6] Hopmans E.C., Weijers J.W.H., Schefuß E., Herfort L., Damsté J.S. & Schouten S., 2004. A novel proxy for terrestrial organic matter in sediments based on branched and isoprenoid tetraether lipids. *Earth and Planetary Science Letters*, 224, 107-116.
- [7] Kropelin S., Verschuren D., Lezine A.-M., Eggermont H., Cocquyt C., Francus P., Cazet J.P., Fagot M., Rumes B., Russel J.M., Darius F., Conley D.J., Schuster M., Suchodoletz H. & Engstrom D.R., 2008. Climate-driven ecosystem succession in the Sahara: The past 6000 years. *Science*, 320, 765-768.



- [8] Kuper R. & Kröpelin S., 2006. Climate-controlled Holocene occupation in the Sahara: Motor of Africa's evolution. *Science*, 313, 803-807.
- [9] Magny M., Nebout N.C., De Beaulieu J.L. & Bout-Roumazeilles V. (Revel M.), 2013. North-south palaeohydrological contrast in the central Mediterranean during the Holocene tentative synthesis and working hypothesis. *Climate of the Past Discussions*, 9(2), 21.
- [10] Manning K. & Timpson A., 2014. The demographic response to Holocene climate change in the Sahara. *Quaternary Science Reviews*, 101(1), 28-35.
- [11] Mascle *et al.*, 2014. The Nile continental margin, a compendium compiled by Jean Mascle. *Marine Geology*, 358, 1-510.
- [12] Pik R., Marty B., Carignan J. & Lavé J., 2003. Stability of the Upper Nile drainage network (Ethiopia) deduced from (U-Th)/He thermochronometry: implications for uplift and erosion of the Afar plume dome. *Earth and Planetary Science Letters*, 215, 73-88.
- [13] Pinardi N. & Masetti E., 2000. Variability of the large scale general circulation of the Mediterranean Sea from observation and modelling: a review. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 158, 153-174.
- [14] Pivot S., 2015. *20,000 Years of Nile flood and Eastern Mediterranean Sea Surface Temperature variability recorded in sediments of the Nile margin*. Master 2, SET, spécialité Gerinat.
- [15] Pivot S., Menot G., Revel, M., Bard E. *et al.*, to be submitted to *Earth and Planetary Science Letters*. 20,000 Years of Nile flood and Eastern Mediterranean Sea Surface Temperature variability recorded in sediments of the Nile margin.
- [16] Revel M., Colin C., Bernasconi S., Combourieu-Nebout N. & Ducassou E., 2014. 21,000 years of Ethiopian African monsoon variability recorded in sediments of the western Nile deep-sea fan. *Regional Environmental Change*, 14, 1685-1696.
- [17] Revel M., Colin C., Ducassou E., Bosch D., Bastian L., Migeon S. & Mascle J., 2015a. Nile flood frequency records from the Nile upper continental slope sediment from 20,000 years. *Quaternary Science Reviews* (special issue : the Quaternary History of the River Nile). DOI : 10.1016/j.quascirev.2015.
- [18] Revel M., Pivot S., Menot G., Bouloubassi I., Colin C., Sicre M.A., Ducassou E., Nebout N., Bosch D. & Migeon S., 2015b. *Nile paleo-flood activity over the last 10,000 years : Records from Nile upper continental slope sediments*. <http://mistrals2015.sciencesconf.org/>
- [19] Rohling E.J., Marini G. & Grant K.M., 2015. Mediterranean climate and oceanography, and the periodic development of anoxic events (sapropels). *Earth-Science Reviews*, 143, 62-97.
- [20] Said R., 1993. *The River Nile. Geology, Hydrology and Utilization*. Pergamon, Oxford, England.
- [21] Skonieczny C., Paillou P., Bory A., Bayon G., Biscara L., Crosta X., Eynaud F., Malaizé B., Revel M., Aleman N., Barusseau J.P., Vernet R., Lopez S. & Grousset F.E. 2015. African Humid periods triggered the reactivation of a large river system in Western Sahara. *Nature Communications*. DOI: 10.1038/ncomms9751.

Fiche de l'Institut océanographique :

- [22] Claude Millot, décembre 2013 : *L'océanographie physique de la Méditerranée*.
<http://www.institut-ocean.org/images/articles/documents/1391079860.pdf>